Condensator toepassingen (deel 2)

In dit tweede deel van dit artikel gaan wij verder met het bespreken van toepassingen waarbij een condensator is opgenomen in een terugkoppeling en komen parallelle LC-kringen aan de orde.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 07-09-2024

Voorwoord

Eerste deel van dit artikel
In het eerste deel van dit artikel hebben wij de onderstaande toepassingen van condensatoren besproken:

1 - De condensator, aangesloten op gelijkspanning
2 - De condensator als tijdbepalend element
3 - De condensator als afvlakker van voedingsspanning
4 - De condensator als integrator en differentiator
5 - De condensator als koppel-element
6 - De condensator, aangesloten op wisselspanning
7 - De condensator als terugkoppel element

Tweede deel van dit artikel
In dit tweede deel van dit artikel komen aan de orde:

8 - De condensator als bootstrap element
9 - De condensator in toonregelingen
10 - De condensator in actieve filters
11 - De condensator in afgestemde kringen
12 - De condensator in oscillatoren

8 - De condensator als bootstrap element

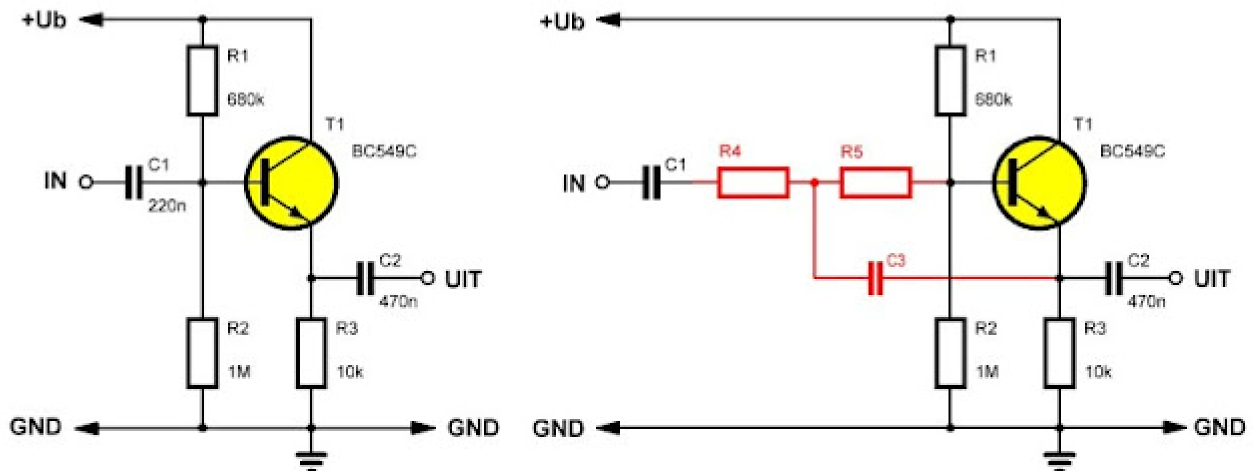
Wat is bootstrapping?
Bootstrapping is een techniek waarbij u een condensator toepast in een meekoppeling tussen de uitgang van een schakeling en een punt ergens in de buurt van de ingang. Door die meekoppeling kunt u een bepaalde eigenschap van de schakeling verbeteren.
Bootstrapping kunt u toepassen voor:

- Verhogen van de ingangsimpedantie.
- Verminderen van de capacitieve belasting.
- Verhogen van het uitsturingsbereik.
- Verhogen van de voedingsspanning.

Van ieder van die toepassingen worden nu voorbeelden gegeven.

Verhogen van de ingangsimpedantie van een emittervolger
Een emittervolger heeft een vrij hoge ingangsweerstand, maar tóch is deze grootheid aan een bepaalde maximale waarde gebonden. De transistor wordt, zie onderstaande figuur links, ingesteld door middel van een weerstandsdeler R1/R2 in de basis. Deze weerstanden

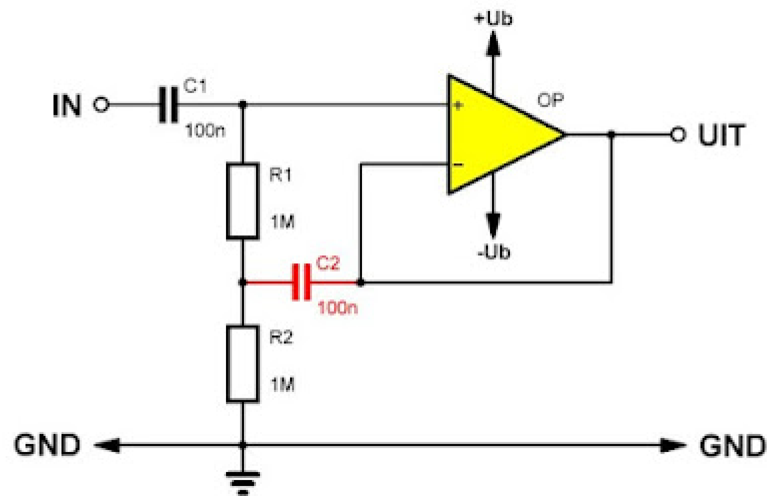
moeten zo hoog-ohmig mogelijk zijn, maar u moet er wel op letten dat de stroom die door de weerstanden vloeit ongeveer tien keer groter is dan de basisstroom van de transistor. Deze weerstandsdeler moet u zó experimenteel bepalen dat de spanning op de emitter gelijk wordt aan de helft van de voedingsspanning. Het ingangssignaal wordt via de scheidingscondensator C1 aangeboden aan de basis en via de scheidingscondensator C2 afgenomen van de emitter.
Door drie extra onderdeeltjes toe te voegen, een condensator en twee weerstanden, kunt u het bootstrap principe toepassen en de ingangsimpedantie flink verhogen. Hoe dat moet is getekend in het rechter schema.



Verhogen van de ingangsimpedantie van een emittervolger. (© 2024 Jos Verstraten)

De werking is als volgt te verklaren. Stel dat u op de ingang een signaal met een frequentie van 1 kHz aanbiedt. Dit signaal belandt op de basis van de emittervolger en ook op de emitter. Via dit punt met een zeer lage weerstand wordt het 1 kHz signaal via de bootstrap condensator C3 teruggekoppeld naar het knooppunt tussen beide weerstanden R4 en R5. Omdat de emittervolger zo goed als éénmaal versterkt en zowel de emitter als C3 een zeer lage weerstand hebben voor het signaal, zal op het knooppunt van beide weerstanden een signaalspanning ontstaan die op een fractie na even groot is als de ingangsspanning. Bovendien zijn beide signalen in fase. Het gevolg is dus dat over de weerstand R4 zo goed als geen signaal staat. Beide aansluitingen staan immers op ongeveer dezelfde wisselspanning. Als er over een weerstand nauwelijks spanning staat, dan zal er ook nauwelijks stroom doorheen vloeien. Het gevolg is dat het signaal op de ingang een zeer hoge weerstand '*ziet*'.
Dank zij het bootstrap principe kunt u de schijnbare ingangsweerstand van een emittervolger opvoeren tot in het MΩ bereik.

Verhogen van de ingangsimpedantie van een op-amp
Op-amp's hebben een zeer hoge ingangsweerstand en het lijkt absoluut overbodig deze nog eens te verhogen door middel van bootstrapping. Maar soms is het van belang een onderscheid te maken tussen de ingangsweerstand voor gelijkspanning en de ingangsimpedantie voor wisselspanning. Dit kan van belang zijn om offsetspanningen te reduceren. Wilt u een ingangsschakeling met een vrij lage weerstand naar de massa maar met een zeer hoge signaalimpedantie, dan kunt u het onderstaande schema toepassen. De positieve ingang van de op-amp '*ziet*' een gelijkstroomweerstand van slechts 2 MΩ naar massa (R1 + R2). Het ingangssignaal '*ziet*' echter een veel hogere ingangsimpedantie vanwege de bootstrapping terugkoppeling van de uitgang via C2. Over R1 valt nauwelijks signaalspanning, dus de ingangsimpedantie is extreem hoog.

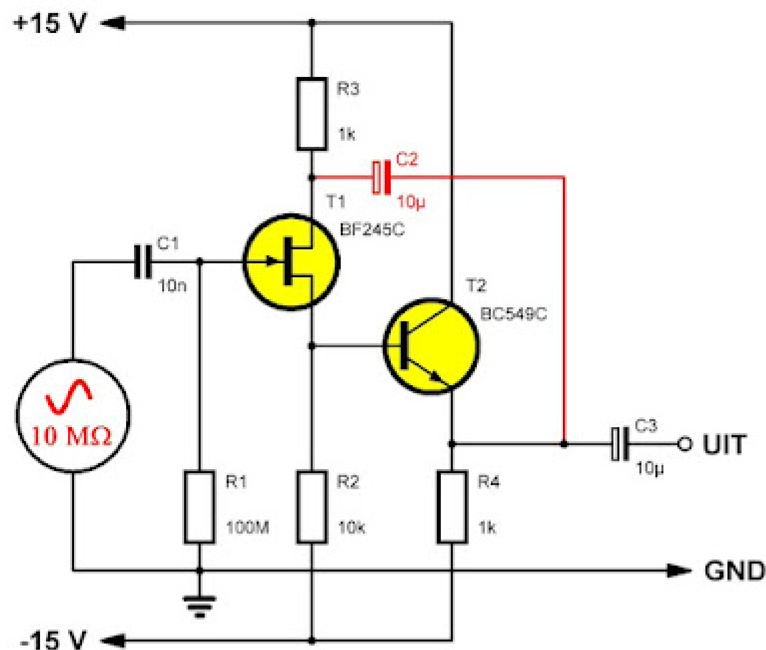


Verhogen van de ingangsimpedantie van een op-amp.
(© 2024 Jos Verstraten)

Verlagen van de invloed van de miller-capaciteit
De miller-capaciteit is de parasitaire capaciteit die aanwezig is tussen de uitgang en de ingang van een actief element zoals een buis, een bipolaire transistor of een FET. Deze capaciteit is de voornaamste oorzaak van de verlaging van de versterkingsfactor bij hoge frequenties. De impedantie van deze capaciteit zorgt immers voor een tegenkoppeling die sterker wordt naarmate de frequentie van het signaal stijgt. De miller-capaciteit werd in 1920 beschreven door de Amerikaanse ingenieur John Milton Miller bij zijn onderzoek van de triode.
De miller-capaciteit staat:

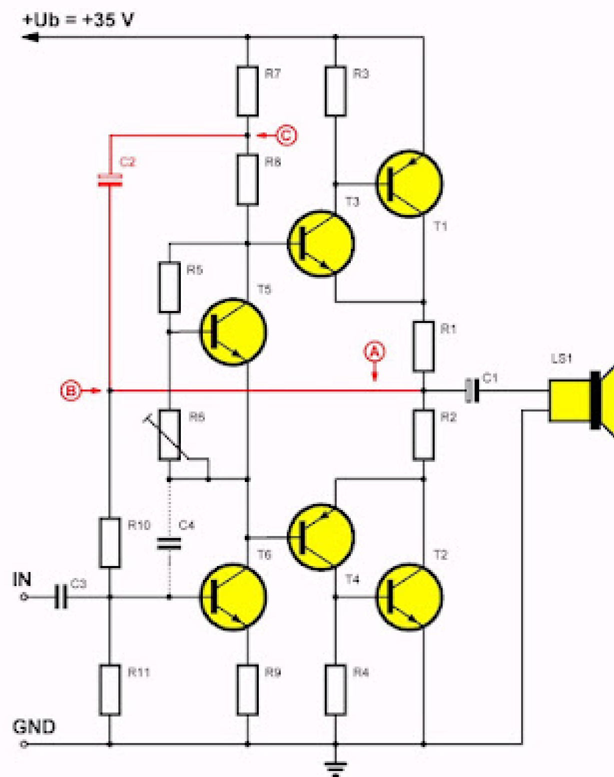
- Bij een buis tussen de roosters en de anode.
- Bij een bipolaire transistor tussen de basis en de collector.
- Bij een FET tussen de gate en de drain.

Een voor de hand liggende methode om de invloed van deze parasitaire capaciteit te reduceren is het spanningsverschil tussen de uitgang en de ingang van het actieve element te verlagen. Hoe kleiner dit spanningsverschil, hoe minder deze capaciteit zich kan opladen en hoe kleiner de parasitaire stromen die kunnen vloeien.
In het onderstaand schema is een mooi voorbeeld van deze techniek voorgesteld. U moet het uitgangssignaal van een signaalbron met een inwendige impedantie van niet minder dan 10 MΩ versterken en dat met een zo groot mogelijke bandbreedte. Het gebruik van een FET ligt voor de hand, maar de miller-capaciteit beïnvloedt het HF-gedrag negatief. Door achter de FET-trap een emittervolger te schakelen en de uitgang van deze schakeling capacitief terug te koppelen naar de drain van de FET vergroot u de bandbreedte van deze schakeling aanzienlijk. Dank zij deze bootstrapping wordt het signaalverschil tussen gate en drain kleiner, waardoor de invloed van de Miller-capaciteit wordt gereduceerd. Gestuurd uit een bron met een inwendige weerstand van 10 MΩ is de bandbreedte van deze schakeling zonder bootstrapping slechts 22 kHz. Mét bootstrapping wordt deze eigenschap vergroot tot niet minder dan 215 kHz.



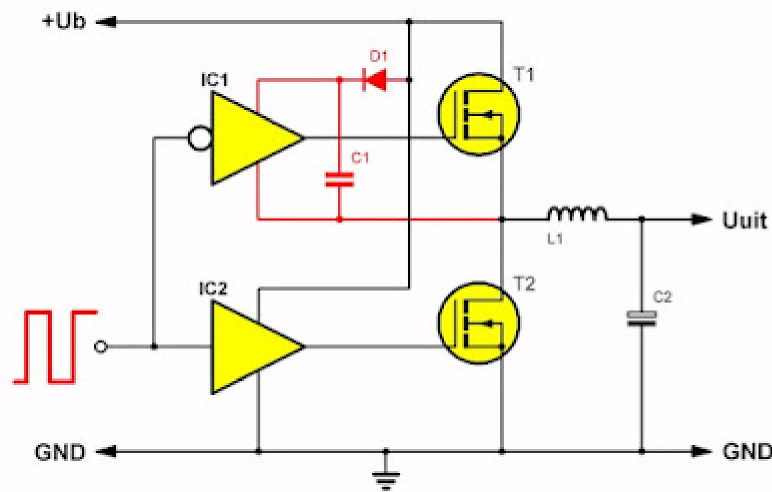
Bootstrapping vergroot de bandbreedte van deze hoogohmige FET-schakeling.
(© 2024 Jos Verstraten)

Verhogen van het uitsturingsbereik
Er zijn nogal wat resistieve belastingen die bij het inschakelen een grote piekstroom vragen. U kunt daarbij denken aan gloeilampen, verwarmingselementen en zelfs relais. Dank zij bootstrapping kunt u een schakeling zó aanpassen dat de leverbare stroom bij inschakelen groot genoeg is. Het principe is steeds identiek. Een deel van het uitgangssignaal wordt capacitief teruggekoppeld naar de voedingsvoorziening van de eindtrap. Daardoor wordt deze eindtrap even gevoed uit een hogere spanning dan de beschikbare voedingsspanning, waardoor u de topwaarde van de stuurstroom naar de eindtrap kunt vergroten.
Deze bootstrapping wordt bij vrijwel iedere audio eindversterker toegepast voor het vergroten van de uitsturing van de eindtransistoren. In het onderstaande schema is de standaard schakeling van een in klasse AB ingestelde eindversterker voorgesteld mét bootstrapping. Condensator C2 in dit schema de bootstrap condensator. Stel dat de versterker maximaal positief wordt uitgestuurd. De spanning op punt A zal dan zeer dicht bij de voedingsspanning liggen. Het zal duidelijk zijn dat de spanningsreserve over R7 en R8 in deze situatie zeer klein is. Gevolg is dat transistor T3 niet volledig uitgestuurd kan worden, waardoor de versterker gaat begrenzen. Door de terugkoppeling via de condensator C2 wordt de spanning op punt C evenwel groter dan de voedingsspanning, waardoor er voldoende spanning over R8 ontstaat om de transistoren uit te sturen.
Momenteel is $U_C = U_A + U_{C2}$. De spanning over de condensator wordt dus opgeteld bij de spanning op punt A, zodat punt C inderdaad tijdelijk op een spanning komt te staan die hoger is dan de voedingsspanning. Als u voor C2 een grote elco kiest, zal de volledige uitsturing van de bovenste helft van de eindtrap eveneens voor lage frequenties verzekerd blijven.



Bootstrapping bij een audio eindversterker.
(© 2024 Jos Verstraten)

Verhogen van de voedingsspanning van een MOSFET eindtrap
Voor het aansturen van grote vermogens of DC/DC-converters worden tegenwoordig meestal pulsgestuurde brug of halve-brug schakelingen gebruikt met MOSFET's. In de meeste gevallen bestaat zo'n brug of halve-brug uit vier of twee N-kanaal MOSFET's omdat die het goedkoopst zijn. In de onderstaande figuur is een dergelijke schakeling getekend. De twee MOSFET's moeten afwisselend in sper en in geleiding worden gestuurd. Daarvoor dienen de twee gate-drivers IC1 en IC2. Let op het inverterend teken aan de ingang van IC1!
N-kanaal MOSFET's krijgen de gewenste zeer lage inwendige weerstand als de spanning op de gate 6 V tot 10 V positiever is dan de spanning op de source. Bij de onderste MOSFET is dat geen probleem, de gate-driver IC2 kan immers uitgestuurd worden tot tegen de voedingsspanning $+U_b$ en levert dan meer dan voldoende spanning voor het uitsturen van T2. Voor het in geleiding sturen van de bovenste MOSFET heeft de schakeling, zonder bootstrapping, echter niet voldoende spanningsreserve. Dank zij de bootstrap-onderdelen C1 en D1 kunt u de voedingsspanning van de bovenste gate-driver echter verhogen tot boven de voedingsspanning, namelijk tot ongeveer de dubbele waarde van $+U_b$. IC1 ligt niet aan de massa, maar aan het knooppunt van beide MOSFET's. Deze driver wordt dus niet gevoed tussen GND en $+U_b$, maar tussen $+U_b$ en $+2xU_b$ en is in staat voldoende spanning te leveren om de bovenste MOSFET in geleiding te sturen.
Omdat de condensator C1 slechts een eindige hoeveelheid lading bevat moet u het laadproces periodiek herhalen. De schakeling werkt dus alleen als u aan de ingang een pulstrein legt. De condensator C1 wordt in de eerste halve periode van de pulsen opgeladen en in de tweede halve periode weer ontladen door de voedingsstroom van IC1.



Het bootstrappen van een MOSFET halve-brug schakeling.
(© 2024 Jos Verstraten)

9 - De condensator in toonregelingen

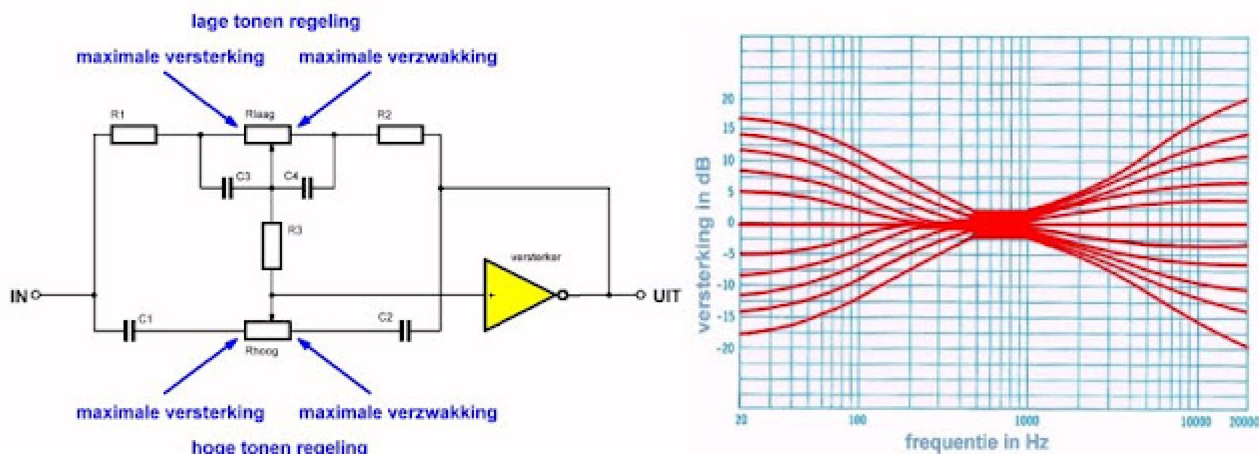
Wat zijn het?
Toonregelingen zijn in wezen niets meer dan frequentie-afhankelijke versterkers, waarvan u de frequentiekarakteristiek door middel van een of meerdere potentiometers of schakelaars kunt instellen. Op deze manier kunt u de frequentieweergave van een audiosysteem aan uw specifieke verlangens aanpassen. In grote lijnen kunt u alle schakelingen indelen in vier groepen:

- **Hoge en lage tonen regelingen**
  Hoewel er in de loop der tijden heel wat van dergelijke schakelingen zijn ontworpen, is er voor analoog huiskamer gebruik in feite maar één standaard: de baxandall-schakeling.
- **Presence-regelingen**
  Met een dergelijke schakeling kunt u een bepaald frequentiegebied extra versterken. In de meeste gevallen wordt een dergelijke regeling gebruikt voor het verstaanbaarder maken van de menselijke stem.
- **Loudness-regelingen**
  Deze regelingen compenseren de niet-lineaire karakteristieken van het menselijk gehoor, zodat de weergave van de lage en de hoge tonen onafhankelijk wordt van het ingestelde volume.
- **RIAA-regelingen**
  Dankzij de RIAA-correctie kunt u de dynamiek van het geluid opgenomen op een vinyl-plaat verhogen en kunt u op eenvoudige manier de plaatruis tot een vrijwel onhoorbaar niveau terug dringen.

Het zal geen verbazing wekken dat die schakelingen alleen kunnen werken door het toepassen van condensatoren in terugkoppelingen.

De baxandall-schakeling
Peter J. Baxandall (1921 - 1995) was een Engelse audio- en elektronica-ingenieur en een pionier in het gebruik van analoge elektronica in audio. Hij werd wereldberoemd met zijn '*baxandall-schakeling*', een eenvoudige regeling waarmee u met twee potentiometers de lage en de hoge tonen van een audioversterker symmetrisch kunt regelen. Deze schakeling werd voor het eerst beschreven in '*Wireless World*' in 1952.
In de onderstaande figuur ziet u links het in wezen heel eenvoudige basisschema van deze regeling, met rechts de al even beroemde baxandall-karakteristieken. U ziet dat deze schakeling vier condensatoren bevat, die samen met de twee potentiometers verantwoordelijk

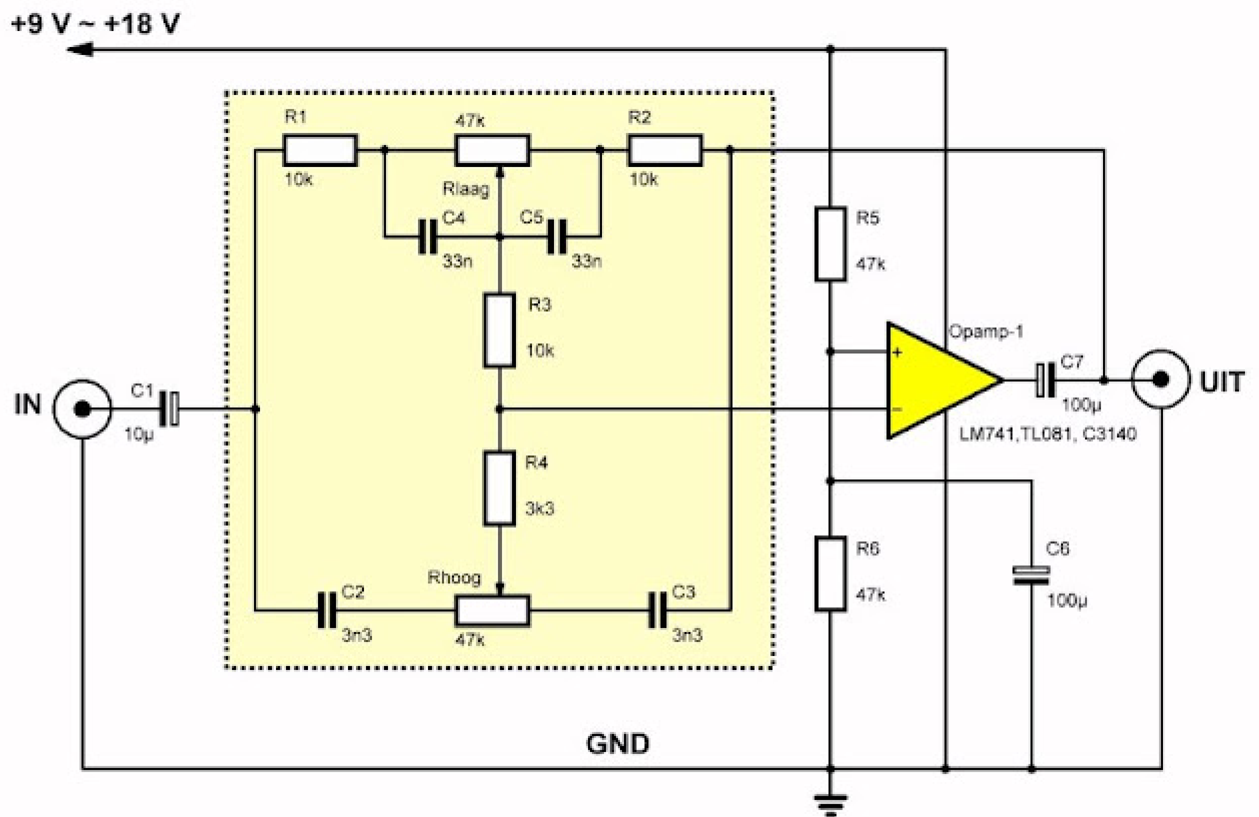
zijn voor de karakteristieken. U merkt ongetwijfeld ook op dat deze vier condensatoren in een terugkoppeling zitten.
De bovenste en onderste rode lijnen geven de maxima en minima weer, respectievelijk met volledig open gedraaide en volledig dicht gedraaide potentiometers.
Noteer dat de horizontale frequentie-as een logaritmische indeling heeft. Het gebied van 10 Hz tot 100 Hz is even breed als dat van 100 Hz tot 1 kHz, etc. Noteer verder dat de verticale versterking-as een indeling in dB heeft.



Basisschema en karakteristiek van het baxandall netwerk. (© 2024 Jos Verstraten)

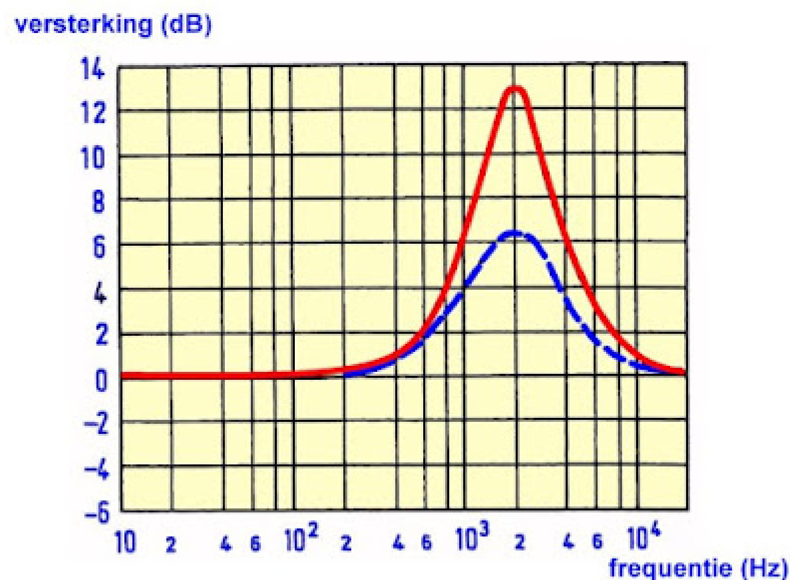
De werking in het kort
Uiteraard wordt er een frequentie-afhankelijke terugkoppeling ingevoerd. Deze schakeling is opgenomen tussen de ingang van een inverterende versterker, de uitgang van de versterker en de signaalingang. Op deze manier kunt u deze terugkoppeling instellen als meekoppeling of als tegenkoppeling. De mate van mee- of tegenkoppeling wordt bepaald door de instelling van de potentiometers. Is er sprake van meekoppeling, dan zullen de lage en/of hoge frequenties versterkt worden. Is er sprake van tegenkoppeling, dan zullen deze frequenties verzwakt worden. Als beide potentiometers in de middenstand staan is er even veel mee- als tegenkoppeling. Beide verschijnselen heffen elkaar op, met als gevolg dat de schakeling volledig lineair werkt. Alle frequenties worden dus even veel versterkt, de frequentiekarakteristiek is kaarsrecht.
De twee potentiometers moeten lineair werkende modellen zijn. U moet maatregelen treffen om te vermijden dat er gelijkstromen door deze onderdelen lopen. Deze veroorzaken immers ruis! In het blauw is aangegeven in welke stand van de loper de lage en hoge tonen worden versterkt of verzwakt.

Een baxandall-schakeling met een op-amp
Uiteraard is de baxandall-schakeling ook geschikt voor aansluiting op een operationele versterker. In het onderstaand schema is hiervan een voorbeeld gegeven. De positieve ingang van de op-amp wordt door middel van de spanningsdeler R5/R6 ingesteld op de helft van de voedingsspanning. Dit punt wordt ontkoppeld door de grote elco C6. Dit punt wordt de referentie voor alle signaalspanningen in de schakeling.



Een baxandall-toonregeling rond een op-amp. (© 2024 Jos Verstraten)

Presence-regelingen
Onder '*presence*' wordt de eigenschap verstaan dat bepaalde frequentiegebieden in een LF-signaal al dan niet aanwezig zijn. Nu is, zoals bekend, het frequentiegebied van de menselijke spraak geconcentreerd rond 2 kHz. Soms is het noodzakelijk dit spraakgebied extra te versterken, waarbij u gebruik kunt maken van een presence-filter. De typische regelkarakteristiek van een presence-filter is getekend in onderstaande figuur. De rode lijn geeft de maximale versterking van de spraakband weer, de blauwe lijn ontstaat als u de potentiometer van het presence-filter half opendraait.

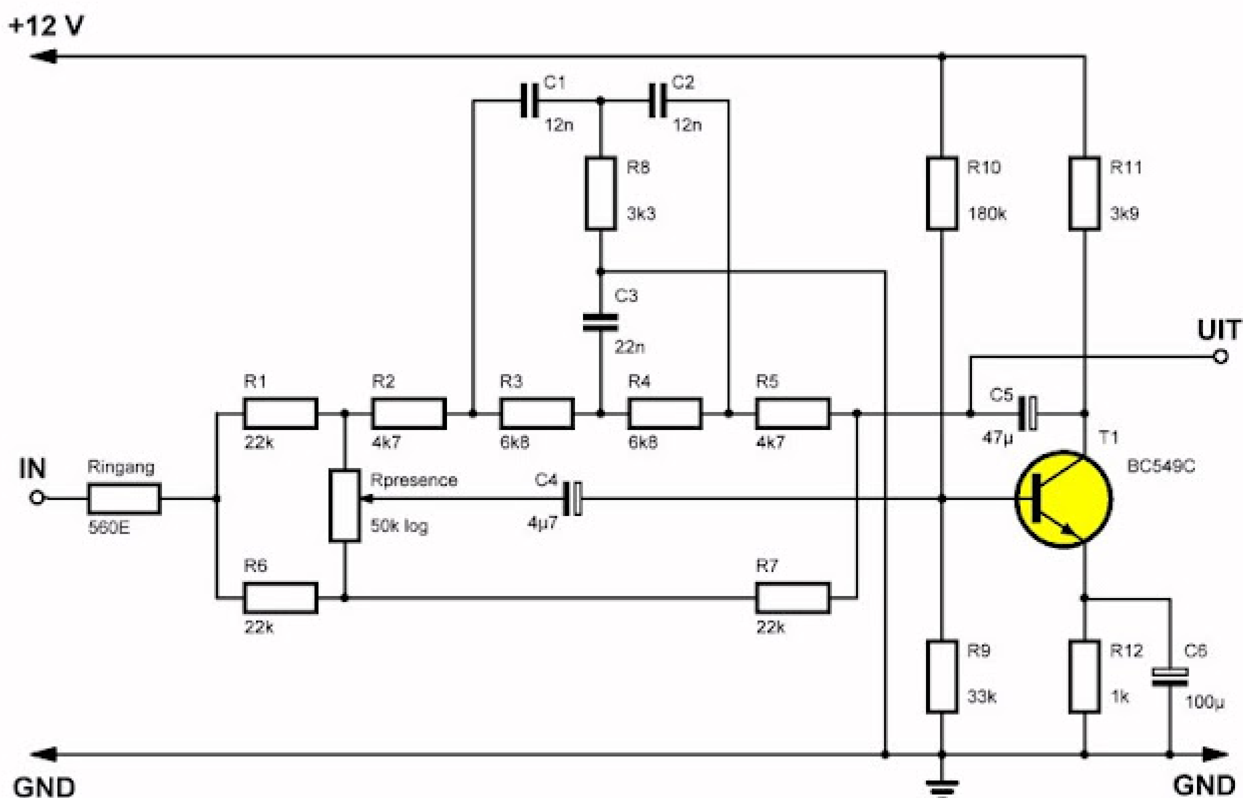


De frequentie-karakteristiek van een presence-regeling.
(© 2024 Jos Verstraten)

Een voorbeeld van een presence-regeling
Dergelijke schakelingen werken vrijwel identiek als de baxandall-regeling. Ook nu is er een RC-netwerk aanwezig tussen de signaalingang, de ingang van de versterkertrap en de

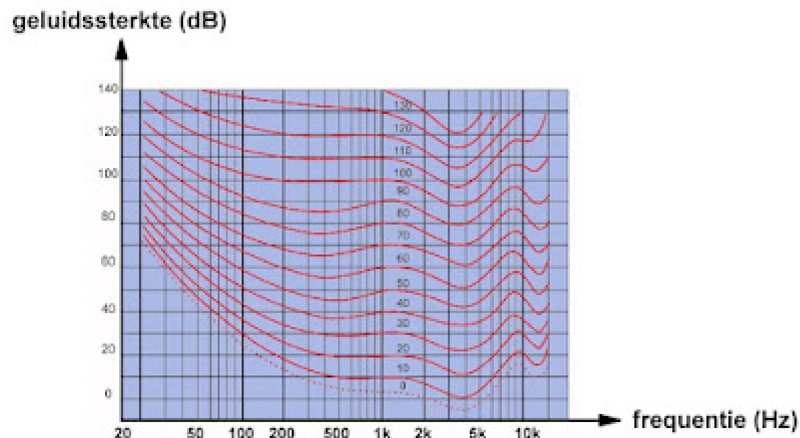
uitgang van de versterker, zie het onderstaand schema. Door middel van een potentiometer kunt u de terugkoppeling weer in min of meerdere mate als meekoppeling laten werken.
Het filter is een combinatie van een laagdoorlaat filter en een hoogdoorlaat filter, waarvan de afsnijfrequenties bij 1 kHz respectievelijk 4 kHz liggen. Beide filters zijn uitgevoerd als T-netwerk. Het hoogdoorlaat filter bestaat uit de onderdelen C1, C2 en R8. Het laagdoorlaat filter is samengesteld uit R3, R4 en C3. De potentiometer $R_{presence}$ schakelt de invloed van deze filters in min of meerdere mate in de signaalweg in. Let er op dat deze potentiometer een logaritmisch type moet zijn.
Tussen de onderdelen van de twee filters bestaan de volgende relaties:

R3 = R4
R8 = ½ R3
C1 = C2
C3 = 2 C1



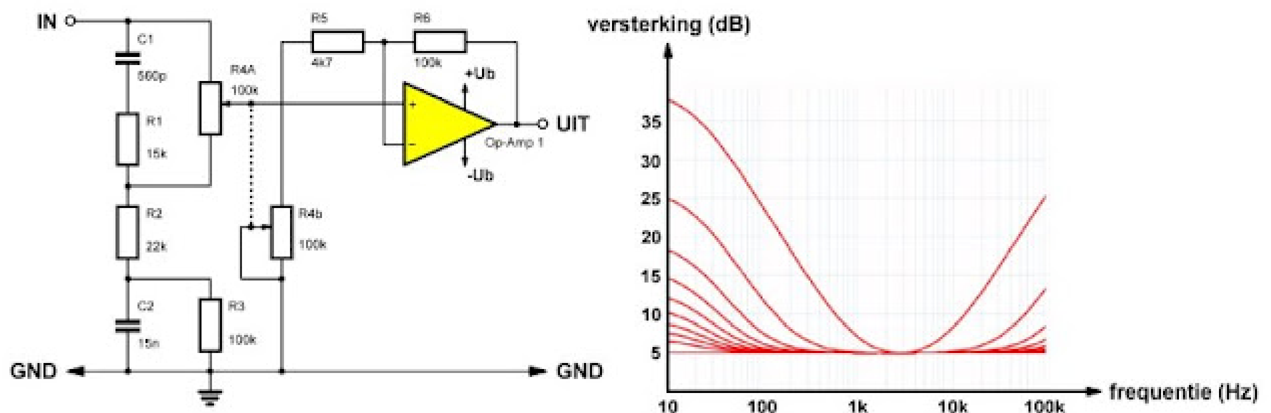
De typische schakeling van een presence-filter. (© 2024 Jos Verstraten)

Loudness-regelingen
Het menselijk gehoor is niet voor iedere frequentie even gevoelig. Met name voor lage en hoge frequenties is het menselijke gehoor heel wat ongevoeliger dan voor signalen met een frequentie rond 1 kHz. Als u dus de toonregeling voor een bepaald vermogen zo instelt dat het geluidsbeeld lekker klinkt, dan zal bij vermindering van het volume opeens blijken dat er veel te weinig lage en hoge tonen aanwezig zijn.
Door Robinson en Dadson werden zogenaamde '*isofonen curves*' opgesteld die de geluidssterkte weergegeven die signalen van een bepaalde frequentie moeten hebben om dezelfde luidheidsindruk in het oor op te wekken als een referentiesignaal van een bepaald volume en een frequentie van 1 kHz. Deze bundel lijnen gaat door het leven als de '*isofonenbundel van Robinson en Dadson*' en is in de onderstaande grafiek voorgesteld. In diverse bronnen wordt deze set curves de '*Fletcher-Munson curves*' genoemd. Deze twee wetenschappers van de Bell laboratoria hebben namelijk een vrijwel identieke isofonenbundel opgesteld. Uit deze grafieken volgt zeer duidelijk dat hoe hoger het volume van een signaal wordt, hoe gelijkmatiger de gevoeligheid van het oor is. Slechts bij zeer lage volumes zal het oor de lage en hoge tonen onevenredig ongevoelig detecteren.



De isofonenbundel van Robinson en Dadson.
(© WikiMedia, edit 2024 door Jos Verstraten)

Een voorbeeld van een actieve loudness-regeling
De onderstaande figuur geeft een schema van een loudness-gecompenseerde versterker die gebruik maakt van een tweetraps regeling. In beide trappen wordt één deel van een stereo potentiometer gebruikt voor het regelen van de verzwakking of de versterking. Als de lopers van de potentiometers in de bovenste stand staan is het compensatie-netwerk niet actief en werkt Op-Amp 1 als niet-inverterende versterker met een spanningsversterking van ongeveer 5 dB. Naarmate u de lopers meer naar onder verplaatst zal de invloed van het frequentieselectief netwerk toenemen. In de onderste stand wordt bij de lage frequenties een versterking van meer dan 30 dB bereikt en bij de hoge frequenties ongeveer 20 dB.



Een actief loudness-filter met stereo potentiometer. (© 2024 Jos Verstraten)

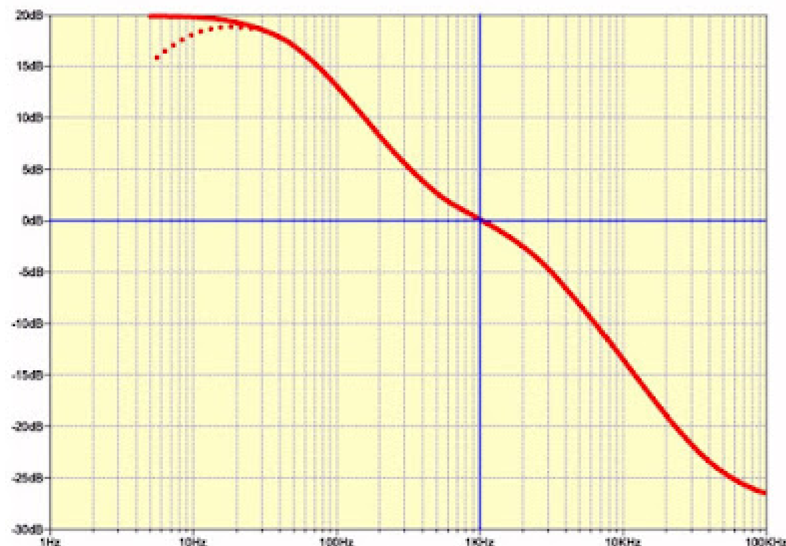
RIAA-regelingen
RIAA is het letterwoord van '*Recording Industries Association of America*', een vereniging van fabrikanten van geluidsdragers die ooit een wereldstandaard heeft opgesteld waarin staat beschreven hoe geluid vastgelegd wordt in de groeven van een vinyl-plaat. In principe komt het er op neer dat de hoge tonen flink worden versterkt alvorens zij in de groeven worden gemoduleerd en dat de lage tonen flink worden verzwakt. Het versterken van de hoge tonen is noodzakelijk omdat deze signalen anders zouden verdrinken in de ruis die per definitie in de groeven van een vinyl-plaat aanwezig is. Lage frequenties vereisen grotere groefuitslagen om correct te worden gereproduceerd. Grote groefuitslagen betekenen echter dat de groeven op een grotere onderlinge afstand worden geschreven, waardoor er minder groeven op een plaat passen en de speelduur wordt verkort. Door de lage frequenties te verzwakken tijdens het opnameproces wordt de grootte van de groefuitslagen verminderd, waardoor er meer muziek op een plaat opgenomen kan worden.

RIAA-correctie
Bij het afspelen van een vinyl-plaat moet u deze opnamekarakteristiek uiteraard weer compenseren door het extra versterken van de lage tonen en door het extra verzwakken van

de hoge tonen. De noodzakelijke frequentiekarakteristíek van een RIAA-voorversterker voor platendraaiers is weergegeven in onderstaande figuur.
De belangrijkste ijkpunten van deze grafiek zijn:

- 50,05 Hz: +17 dB
- 500,5 Hz: +3 dB
- 1 kHz: 0 dB
- 2,12 kHz: -3 dB
- 21,21 kHz: -20 dB

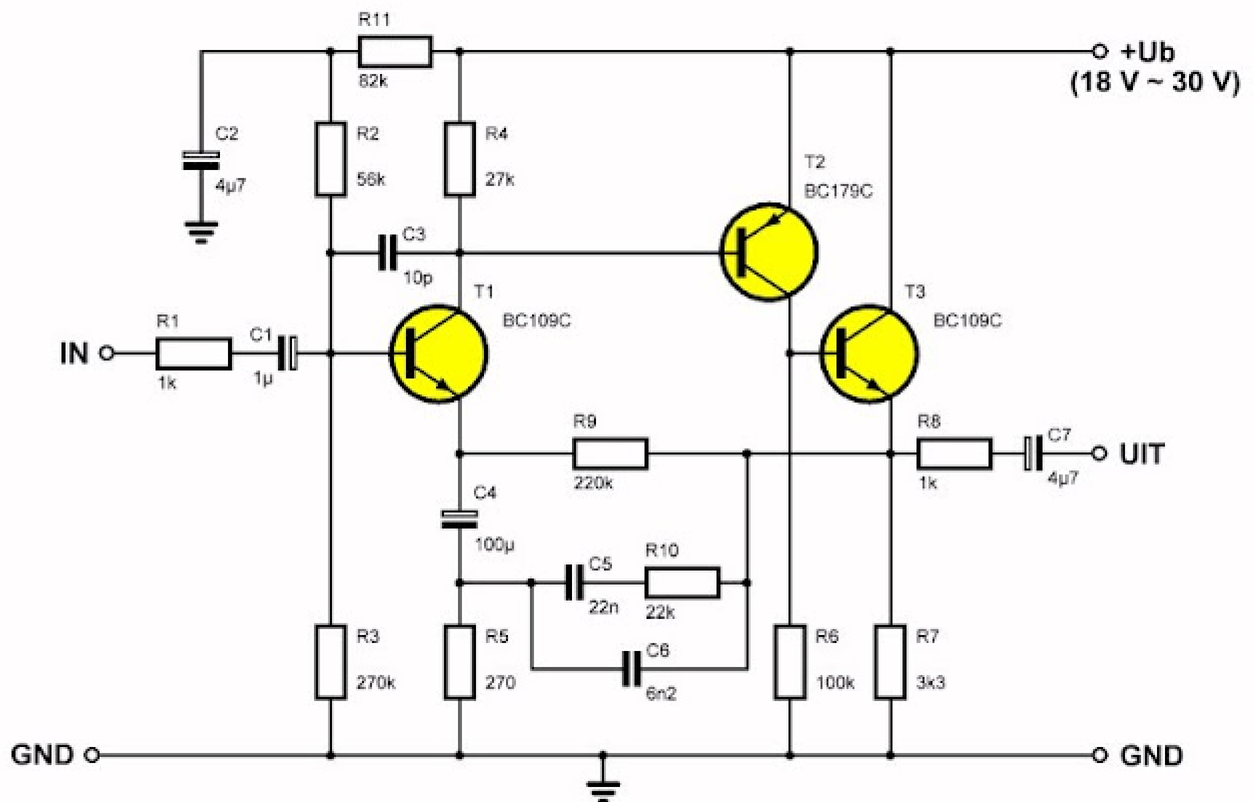
De gestippeld getekende verzwakking van de zeer lage frequenties is een aanvulling op de norm, die is ingevoerd om het gerommel van de motor van de draaitafel te onderdrukken. Dat bleek noodzakelijk toen versterkers en luidsprekers steeds beter werden en steeds lagere frequenties konden weergeven.



De weergavekarakteristiek voor het compenseren van de opnamekarakteristiek.
(© 2024 Jos Verstraten)

Een eenvoudige praktische RIAA-versterker

In onderstaande figuur wordt een eenvoudige RIAA-versterker voorgesteld, opgebouwd uit een tweetraps PNP/NPN-versterker en een emittervolger aan de uitgang. Het terugkoppel netwerk dat zorgt voor de RIAA-compensatie bestaat uit de onderdelen R9, R10, C5 en C6. U moet de waarde van deze onderdelen zo nauwkeurig mogelijk aanhouden. De niet-standaard condensator van 6,2 nF moet u samenstellen uit de parallel- of serieschakeling van verkrijgbare condensatoren. De weerstandsdeler R2/R3, die de basis van de eerste transistor instelt, wordt niet rechtstreeks gevoed uit de voedingsspanning. De condensator C2 vlakt de voedingsspanning voor de weerstandsdeler extra af. De emittercondensator C4 zorgt voor de extra verzwakkíng van de allerlaagste frequenties. Voor deze frequenties heeft de condensator een hoge impedantie, waardoor de versterking van de schakeling gaat dalen.
U kunt de schakeling het best zo dicht mogelijk bij het element in uw platenspeler inbouwen.
De versterker levert een versterking van ongeveer 50 bij 1 kHz en kan gestuurd worden met signalen tot maximaal 120 $mV_{effectief}$. De maximale onvervormde waarde van de uitgangsspanning bedraagt, dank zij de hoge voedingsspanning van 30 V, 6,2 $V_{effectief}$.



Een eenvoudige RIAA-versterker. (© 2024 Jos Verstraten)

10 - De condensator in actieve filters

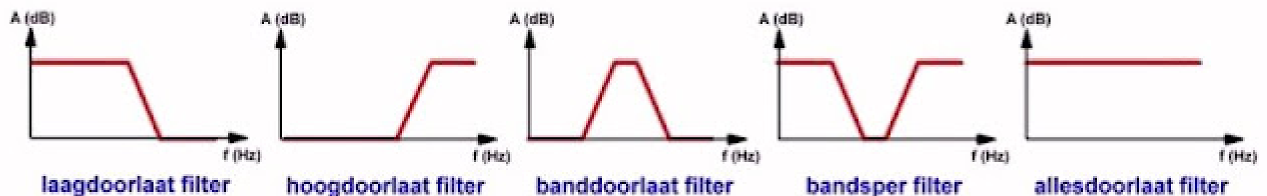
Wat zijn actieve filters?
Een actief filter is een schakeling met minstens één actief element zoals een transistor of een op-amp. Bovendien heeft zo'n schakeling een frequentie-afhankelijke doorlaat- of amplitude-karakteristiek. Dat wil zeggen dat de versterking of verzwakking van de schakeling afhankelijk is van de frequentie van het signaal dat u aan de ingang aanlegt. De doorlaatkarakteristiek is dan ook dé belangrijkste specificatie van gelijk welk filter. In de meeste gevallen wordt de versterking of verzwakking bij verschillende frequenties uitgedrukt in dB ten opzichte van een referentie-frequentie waarbij de verzwakking of versterking wordt gelijk gesteld aan 0 dB. Meestal is dat 1 kHz.
Actieve filters kunt u op verschillende manieren indelen. Een voor de hand liggende indeling is uiteraard naar de doorlaatkarakteristiek. In de praktijk kan men vijf typen van filters onderscheiden:

- **Laagdoorlaat filter**
  Het ideale laagdoorlaat filter laat alle frequenties vanaf 0 Hz tot een bepaalde afsnijfrequentie f0 onverzwakt door. Deze f0 noemt men in het Engels de '*cutoff frequency*' of '*afsnijfrequentie*' en deze term zult u vaak tegenkomen. Boven deze frequentie worden de signalen verzwakt, waarbij de verzwakking toeneemt naarmate de frequentie stijgt.
- **Hoogdoorlaat filter**
  Dit filter werkt tegengesteld. Alle signalen met een frequentie beneden een bepaalde afsnijwaarde worden verzwakt. Naarmate de frequentie stijgt neemt de verzwakking echter af. Alle signalen met frequenties boven de afsnijfrequentie worden onverzwakt doorgelaten.
- **Banddoorlaat filter**
  Dit filter laat alleen signalen door die frequenties hebben die tussen twee grenswaarden liggen. Afhankelijk van de samenstelling van het filter kunnen deze twee

grensfrequenties dicht bij elkaar liggen (smalbandig filter) of ver uit elkaar liggen (breedbandig filter).

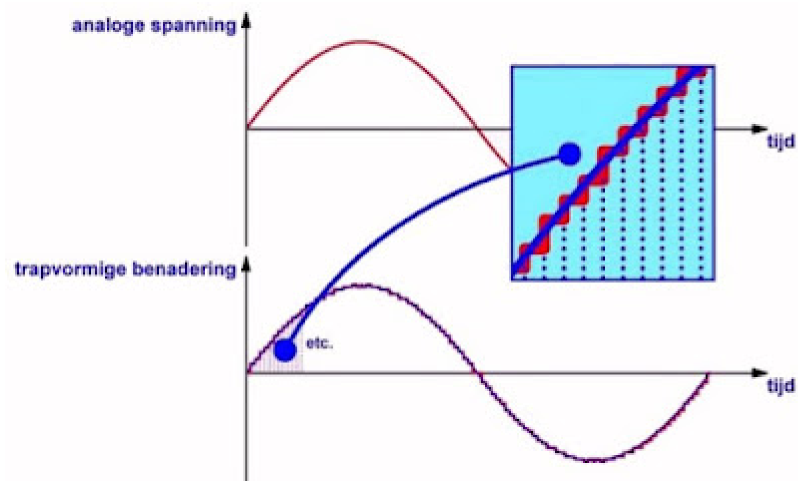
- **Bandsper filter**
  Het bandsper filter blokkeert alle signalen met frequenties tussen twee grenswaarden. Ook nu kunnen deze grenswaarden ver of dicht uit elkaar liggen.
- **Allesdoorlaat filter**
  Dit lijkt in eerste instantie een onzinnig filter. Alle frequenties worden namelijk onverzwakt doorgekoppeld, maar er ontstaat een faseverschuiving tussen het signaal aan de ingang en het signaal aan de uitgang.

De doorlaatkarakteristieken van deze vijf typen zijn samengevat in de onderstaande figuur.



De vijf basis filterschakelingen. (© 2024 Jos Verstraten)

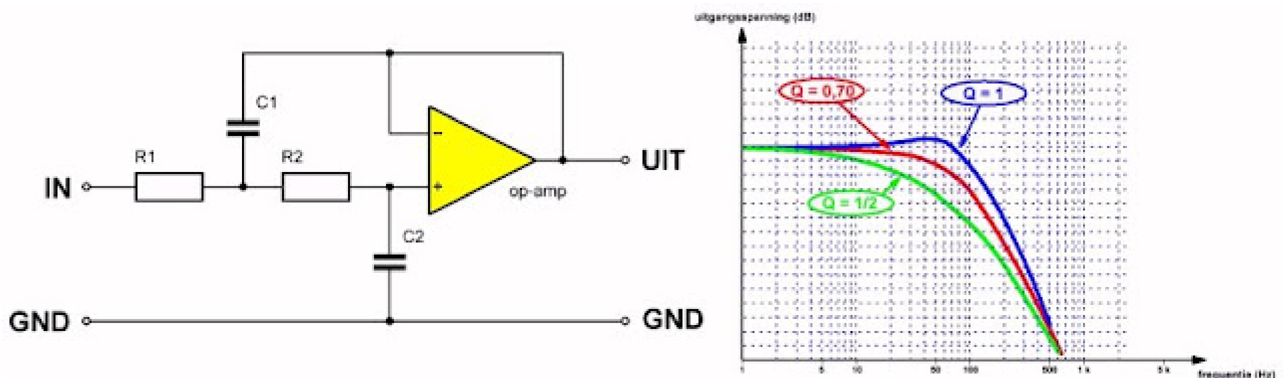
Laagdoorlaat filters heel vaak gebruikt
In het kader van een overzicht artikel over toepassingen van condensatoren gaat het veel te ver om uitgebreid in te gaan op alle fijne kneepjes van actieve filters. Wél is duidelijk dat laagdoorlaat filters vaak worden toegepast en vandaar dat wij hier wat aandacht aan besteden.
Zowel in de analoge als in de digitale elektronica is ruis een van de belangrijkste stoorsignalen waar u als elektronicus mee te maken krijgt. In de onderstaande figuur is bijvoorbeeld getekend wat er gebeurt als u een analoge spanning digitaliseert, opslaat in een geheugen en nadien weer omzet in een analoge spanning. De DAC die deze herwonnen analoge spanning maakt levert, per definitie, een '*trapvormige benadering*' van de originele analoge spanning. Deze kleine sprongetjes in het signaal uiten zich onder de vorm van een hinderlijke '*digitale ruis*' ook wel '*kwantiseringsruis*' genoemd. Deze ruis kunt u uit het herwonnen analoge signaal verwijderen door gebruik te maken van een laagdoorlaat filter.
Ook bij het weergeven van oude vinyl-platen kunt u veel plezier beleven aan een laagdoorlaat filter dat de ruis die soms op oude opnames aanwezig is in min of meerdere mate elimineert.



Het verschijnsel 'digitale ruis' wordt verklaard. (© 2024 Jos Verstraten)

Tweede orde laagdoorlaat filter zonder versterking
In de onderstaande figuur is links een vaak toegepast laagdoorlaat filter voorgesteld. Er zijn twee RC-netwerken aanwezig, waarvan het tweede wordt opgenomen in de terugkoppeling van de operationele versterker. De werking is als volgt. Bij lage frequenties hebben de condensatoren zeer hoge impedanties en kunnen verwaarloosd worden. Het schema herleidt zich dan tot een bufferversterker, waarbij de twee weerstanden in serie met de ingang zijn opgenomen. Omdat echter de ingang van de operationele versterker een zeer hoge

impedantie heeft, zal over deze weerstanden geen spanning vallen. De versterking van de schakeling is gelijk aan 1.
Naarmate de frequentie stijgt zal de impedantie van de condensatoren steeds kleiner worden. Er ontstaat een terugkoppeling van de uitgang naar de ingang via condensator C1. Condensator C2 vormt weer de spanningsdeler van een eerste orde filter. Het gevolg van deze dubbele werking is dat het filter na de afsnijfrequentie met 12 dB/octaaf gaat verzwakken.



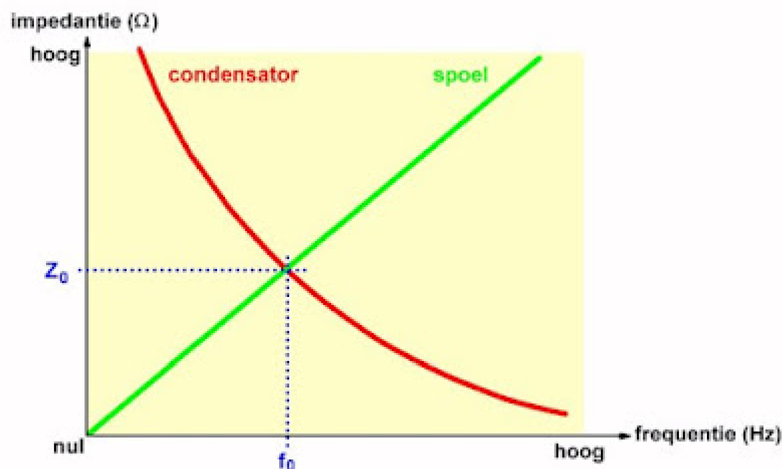
Basisschema van een laagdoorlaat filter van de tweede orde zonder versterking.
(© 2024 Jos Verstraten)

De kwaliteitsfactor Q
In de meeste gevallen kunt u aan de twee weerstanden identieke waarden geven. De karakteristieken van het filter rond de afsnijfrequentie f_0 zijn afhankelijk van de verhouding tussen de twee condensatoren. Deze eigenschap wordt uitgedrukt door de kwaliteitsfactor Q van het filter.
Voor de beschreven schakeling kunt u deze factor berekenen met de uitdrukking:
Q = √ [R1 ● R2 ● C1 ● C2] / [C2 ● (R1 + R2)]
Het is een beetje moeilijk om wiskundige formules in Internet-code te schrijven. Met √ wordt het vierkantswortel teken bedoeld dat in deze formule betrekking heeft op [R1 ● R2 ● C1 ● C2].
De invloed van de kwaliteitsfactor op de amplitude-karakteristiek is getekend rechts in de bovenstaande figuur. U ziet drie praktische curves getekend voor kwaliteitsfactoren tussen 1 en 0,5. Duidelijk blijkt dat alle drie de curves een 12 dB/octaaf verzwakking hebben, maar dat rond de afsnijfrequentie sprake kan zijn van extra verzwakking of van lichte signaalopslingering. Als u prijs stelt op een zo vlak mogelijke amplitude-karakteristiek geeft u Q een waarde van precies 0,707!

11 - De condensator in afgestemde kringen

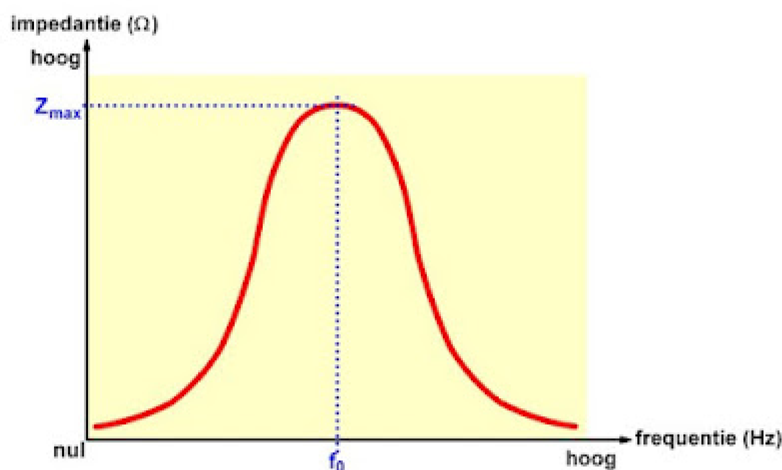
De impedantie van C en L
In het eerste deel van dit artikel werd in de paragraaf '*6 - De condensator, aangesloten op wisselspanning*' het begrip '*impedantie*' geïntroduceerd. De wisselstroomweerstand van een condensator C is niet constant, maar daalt naarmate de frequentie stijgt. De formule hiervoor is:
$Z_C = 1 / [2 \cdot \pi \cdot f \cdot C]$
Op identieke manier kan men aantonen dat de wisselstroomweerstand van een spoel L ook niet constant is, maar stijgt naarmate de frequentie stijgt. De formule hiervoor is:
$Z_L = L \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$
U kunt beide formules omzetten in een grafiek, waarin de horizontale as de frequentie f weergeeft en de verticale as de impedantie Z van C en L. In de onderstaande figuur ziet u een dergelijke grafiek voor een bepaalde condensator C (rood) en een bepaalde spoel L (groen).
Als de frequentie gelijk is aan nul (gelijkspanning) heeft de spoel een weerstand van 0 Ω en de condensator een oneindig hoge weerstand. Als de frequentie hoog is heeft de spoel een

zeer hoge impedantie en de condensator een impedantie die bijna gelijk is aan nul. Het is duidelijk uit deze grafiek dat er één bepaalde frequentie f_0 bestaat waarbij de condensator en de spoel een even grote impedantie Z_0 hebben.



Impedantieverloop van C en L in functie van de frequentie.
(© 2024 Jos Verstraten)

De impedantie van de parallel schakeling van C en L
Wat gebeurt er als u die condensator C en die spoel L parallel schakelt en de impedantie meet in functie van de frequentie? Bij het parallel schakelen van twee impedanties is de totale impedantie Z altijd kleiner dan de kleinste impedantie. Bij lage frequenties zal dus de lage impedantie van de spoel de totale impedantie laag houden. Bij stijgende frequentie zal de totale impedantie stijgen. Als de frequentie echter nog meer stijgt zal de steeds lager wordende impedantie van de condensator de totale impedantie weer naar beneden dwingen. Men kan berekenen dat de totale impedantie van de parallel schakeling van een condensator C en een spoel L een maximale waarde Z_{max} bereikt bij de frequentie f_0. Dit noemt men de '*resonantie-frequentie*' van de parallelle LC-kring.

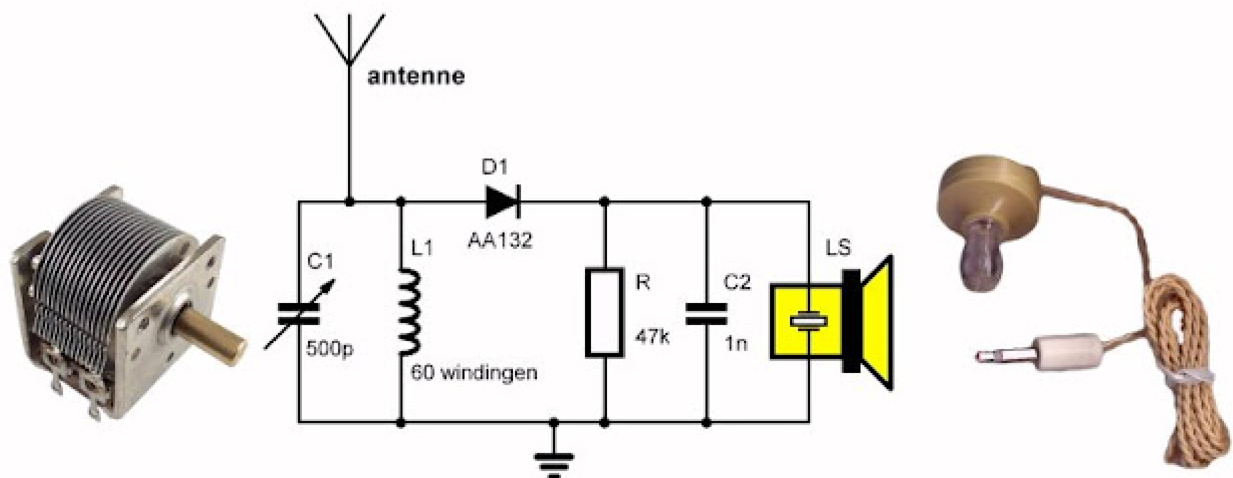


Impedantieverloop van de parallel schakeling van C en L.
(© 2024 Jos Verstraten)

De parallelle afgestemde LC-kring
De parallelschakeling van een condensator C en een spoel L noemt men een '*afgestemde kring*'. Afgestemd, omdat deze kring bij slechts één welbepaalde frequentie f_o een maximale impedantie heeft. De waarde van die frequentie wordt gegeven door de formule:
$f_0 = 1 / [2 \bullet \pi \bullet \sqrt{(L \bullet C)}]$
In woorden: de resonantie-frequentie is gelijk aan één gedeeld door twee keer pi maal de vierkantswortel uit L maal C. Pi staat voor het getal 3,1416...
Wat heeft een dergelijke schakeling voor nut? Stel dat u een zender die uitzendt op een frequentie van 1 MHz uit de lucht wilt plukken. U vangt echter niet alleen dat ene signaal op

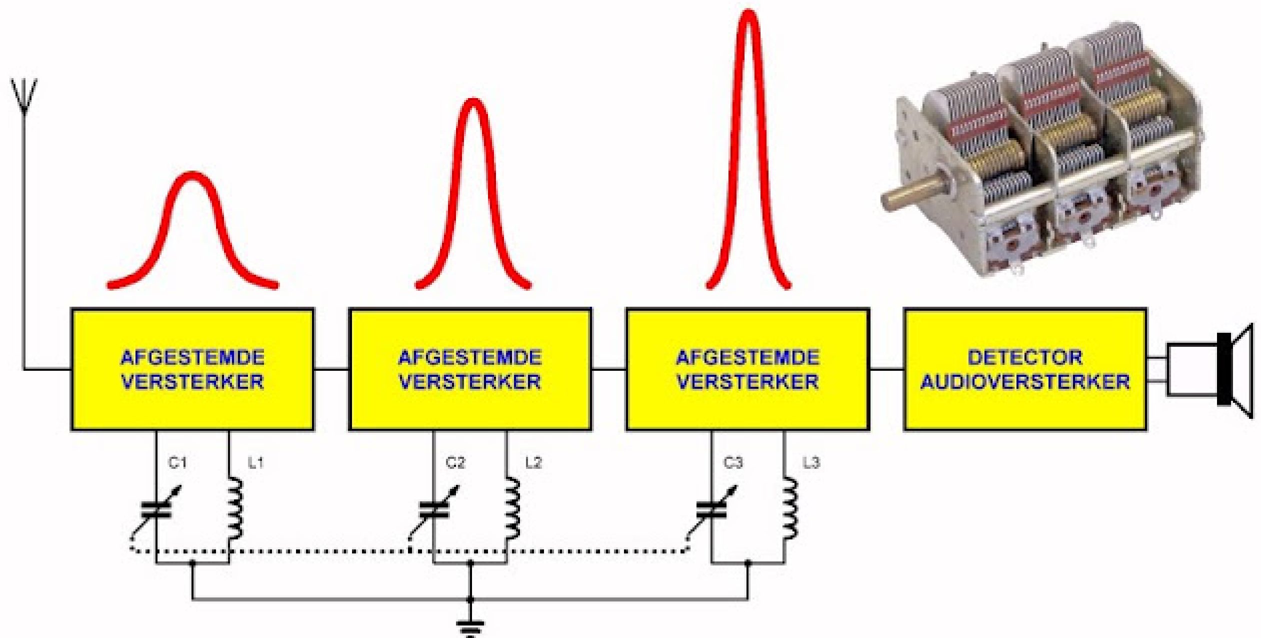
met uw antenne, maar tevens honderden andere signalen van andere zenders met allemaal verschillende frequenties. Als u nu uw antenne aansluit op een parallelle LC-kring die is afgestemd op een resonantie-frequentie van 1 MHz zal het signaal van de gewenste zender een maximaal signaal over die LC-kring opwekken. Bij 1 MHz is immers de impedantie van de kring het grootst met als gevolg dat er ook de grootste spanning over ontstaat.
Dit is een uiterst belangrijke toepassing van de condensator. U kunt één signaal met een specifieke frequentie selecteren uit een breed spectrum van binnenkomende signalen.
De volledige telecommunicatie, dat betekent radio, TV, telefonie, radar, modem, Bluetooth, internet, etc, kan alleen functioneren door gebruik te maken van dergelijke afgestemde LC-kringen.

De kristalradio als eenvoudigste toepassing
De eenvoudigste toepassing van een condensator in een afgestemde LC-kring is ongetwijfeld de kristalradio. In de onderstaande figuur ziet u het eenvoudigste schema van zo'n radio-ontvanger.
De afgestemde kring bestaat uit de regelbare condensator C1 en de spoel L1. Die bestaat uit 60 windingen koperdraad rond de kartonnen kern van een rol WC-papier. Hoe een regelbare condensator er uitziet is voorgesteld aan de hand van een voorbeeld, links naast het schema. Door het variëren van de waarde van die condensator kunt u de afstemfrequentie van de radio variëren. Het signaal dat over de LC-kring ontstaat is uiteraard een met audio gemoduleerde hoogfrequente wisselspanning. Die spanning wordt gelijkgericht door de diode D1. Daarvoor **MOET** u een ouderwetse germanium-diode gebruiken, moderne silicium exemplaren hebben een te hoge geleidingsspanning. Naast de in het schema genoemde AA132 kunt u ook een OA72, een 1N34 of een 1N132 toepassen. Deze typen zijn tegenwoordig nog wel te koop. De condensator C2 is de afvlakcondensator waarop het op de gelijkgerichte wisselspanning aanwezige audio-signaal komt te staan.
Om dit signaal hoorbaar te maken moet u een heel gevoelig piëzoceramisch oortelefoontje gebruiken. Ook dit ziet u naast het schema, maar dan nu rechts.



De kristalradio is de eenvoudigste toepassing van een LC-kring. (© 2024 Jos Verstraten)

Het principe van de rechtuit ontvanger
Een simpele LC-kring heeft in feite een te grote bandbreedte om heel exact één frequentie uit te filteren. Dat betekent dat, om bij ons voorbeeld te blijven, ook het signaal van een zender op een frequentie van 1,1 MHz door die enkele LC-kring versterkt zal worden en dus hoorbaar zal worden. Om dit probleem op te lossen heeft men, héél lang geleden, het principe van de '*rechtuit ontvanger*' ontwikkeld. Men schakelt een aantal door middel van identieke LC-kringen afgestemde versterkers achter elkaar. Die trappen staan allemaal afgestemd op dezelfde frequentie. Het gevolg is dat het ene signaal met een frequentie van 1 MHz (ons voorbeeld, alweer) steeds meer versterkt wordt en alle overige signalen steeds minder.
In de praktijk heeft men dus drie variabele condensatoren nodig die met slechts één knop instelbaar zijn. In het onderstaand schema is getekend hoe zo'n onderdeel er uitziet.



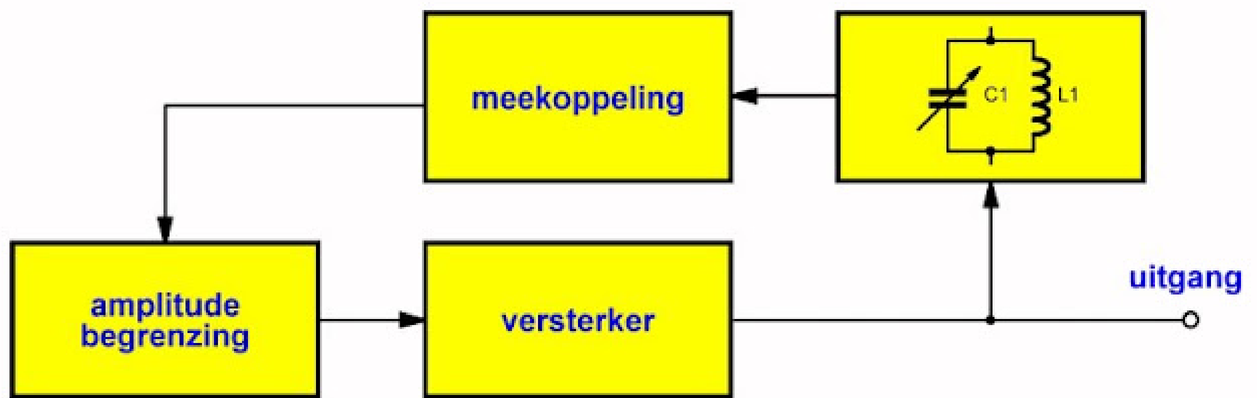
Het principe van de rechtuit ontvanger. (© 2024 Jos Verstraten)

Superheterodyne-principe
Over het onderwerp '*De condensator in afgestemde kringen*' is veel meer te vertellen dan in dit overzicht artikel past. Wij volstaan hier met op te merken dat het principe van de rechtuit ontvanger op dit moment nauwelijks nog wordt toegepast. Men heeft betere systemen ontworpen (*superheterodyne-principe*) om één welbepaalde frequentie uit breed spectrum van binnenkomende signalen te filteren. Maar ook bij die systemen moet men een beroep doen op condensatoren in afgestemde LC-kringen.

12 - De condensator in oscillatoren

Wat is een oscillator?
Het woord oscillator is afkomstig van het Latijnse woord '*oscillare*' hetgeen zwaaien of trillen betekent. Oscillatoren zijn schakelingen die heen en weer zwaaiende spanningen, in de regel sinussen, opwekken. In deze toepassing van condensatoren hebben wij het over schakelingen met LC-kringen waarmee u hoogfrequente sinussen kunt genereren.

Algemeen blokschema van een oscillator
Een oscillator is volgens het blokschema van de onderstaande figuur samengesteld uit een versterker, een meekoppeling, een amplitudebegrenzing en een frequentiebepalend netwerk. Het frequentiebepalend netwerk is samengesteld uit de parallelschakeling van een spoel L1 en een condensator C1. De meekoppeling bestaat uit een terugkoppeling van de uitgang naar de ingang, waarbij een deel van de uitgangsspanning in fase met de ingangsspanning aan de ingang wordt aangeboden. Door deze terugkoppeling zal het signaal aan de ingang vergroten. Deze hogere ingangsspanning wordt weer versterkt door de versterker en een deel van het versterkte signaal wordt weer in fase aan de ingang aangeboden. Zonder de amplitudebegrenzing zou het signaal dat in fase naar de ingang wordt teruggekoppeld er voor zorgen dat de uitgangsspanning binnen de kortste keren zou vastlopen tegen de massa en de voedingsspanning.
De begrenzer zorgt ervoor dat het signaal op de uitgang zich stabiliseert op een bepaalde maximale waarde, waardoor het vastlopen wordt voorkomen en op de uitgang een mooie sinus ontstaat.



Algemene voorstelling van een LC-oscillator. (© 2024 Jos Verstraten)

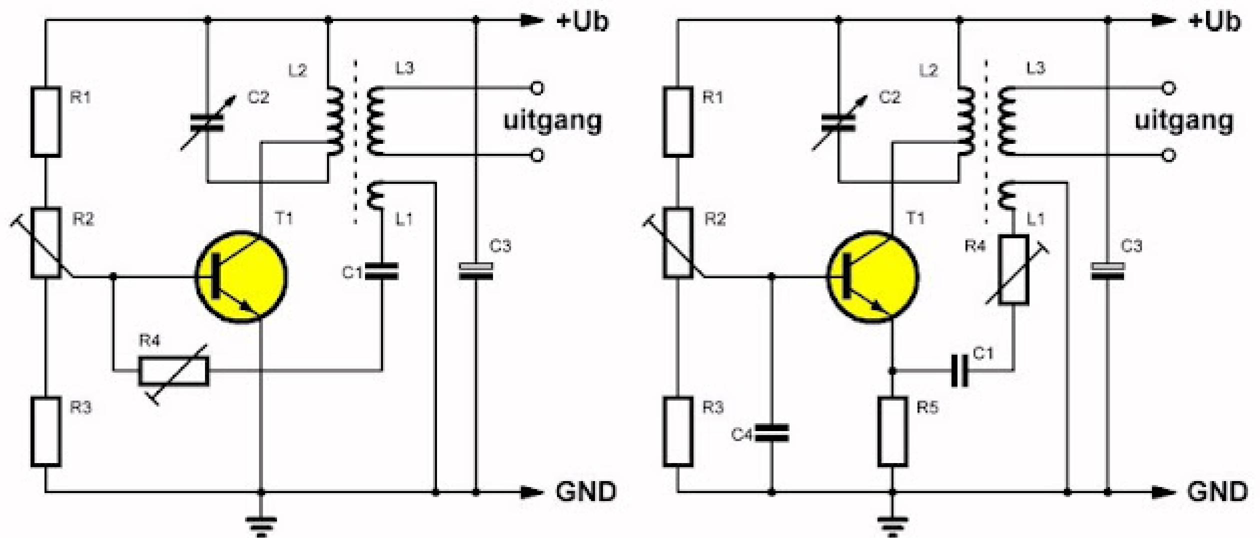
Om deze schakeling te laten oscilleren moet aan twee belangrijke voorwaarden worden voldaan:

- **De amplitude voorwaarde**
  De oscillatie ontstaat en zal in stand blijven, dan en slechts dan als de rondgaande versterking minstens gelijk is aan 1. In formulevorm: $K \cdot A \geq 1$. K is de koppelfactor, A de versterking van de versterker. Als K kleiner is dan A^{-1} (1/A) zal de schakeling na het aanzetten niet gaan oscilleren. Als u de schakeling door een externe impuls toch in oscillatie brengt zal het signaal op de uitgang langzaam maar zeker uitsterven. Als K groter is dan A^{-1} zal de uitgangsspanning steeds groter worden tot zij vastloopt tegen de massa en de voedingsspanning en meer op een blokgolf dan op een sinus lijkt.
- **De fase voorwaarde**
  Een deel van de uitgangsspanning moet in fase op de ingang van de schakeling verschijnen. Onder de vorm van een formule: $\varphi = 0°$.

Oscillatoren met LC-kringen
Er bestaan ontelbare soorten LC-oscillatoren, waarvan de meeste genoemd zijn naar de man (of vrouw) die de schakeling heeft ontworpen. De bekendste schakelingen zijn:
- De Meißner oscillator.
- De Colpitts oscillator.
- De Hartley oscillator.

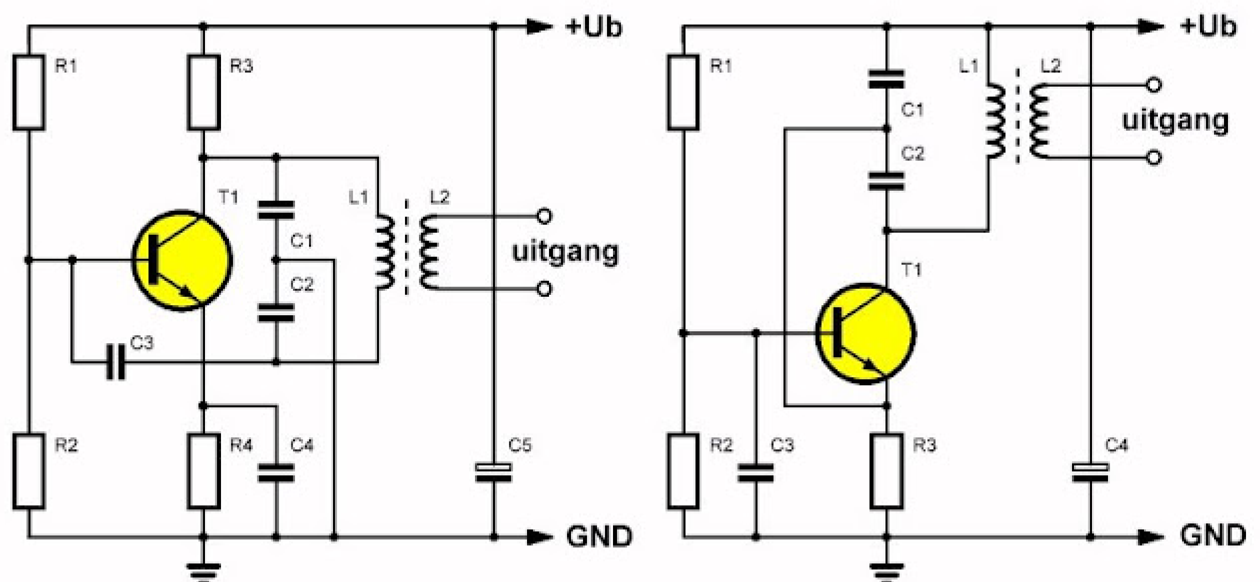
Wij zullen deze drie schakelingen tot slot van dit artikel in het kort bespreken. Deze schakelingen bestaan in een uitvoering met gemeenschappelijke emitter en een met gemeenschappelijke basis.

De Meißner oscillator
Bij dit type oscillator wordt het teruggekoppelde signaal bij gebruik van een emitter-schakeling naar de basis terug geleid en bij gebruik van een basis-schakeling naar de emitter. In de onderstaande figuur is het principeschema van beide schakelingen weergegeven. In beide gevallen bepaalt de kring C2/L2 de oscillatie-frequentie.
Met de potentiometer R2 kunt u het werkpunt van de transistor instellen, de waarde van de potentiometer R4 bepaalt de mate van terugkoppeling. De condensator C1 zorgt ervoor dat de gelijkspanning niet via L1 kortgesloten kan worden. De terugkoppelspoel L1 heeft, vanwege de zeer lage ingangsimpedantie van de transistor, slechts enige windingen. Bij de basis-schakeling wordt inductief teruggekoppeld naar de emitter. De condensator C4 legt de basis voor signaalspanningen aan de massa.



Principe van de Meißner oscillator, links met emitter-, rechts met basis-schakeling.
(© 2024 Jos Verstraten)

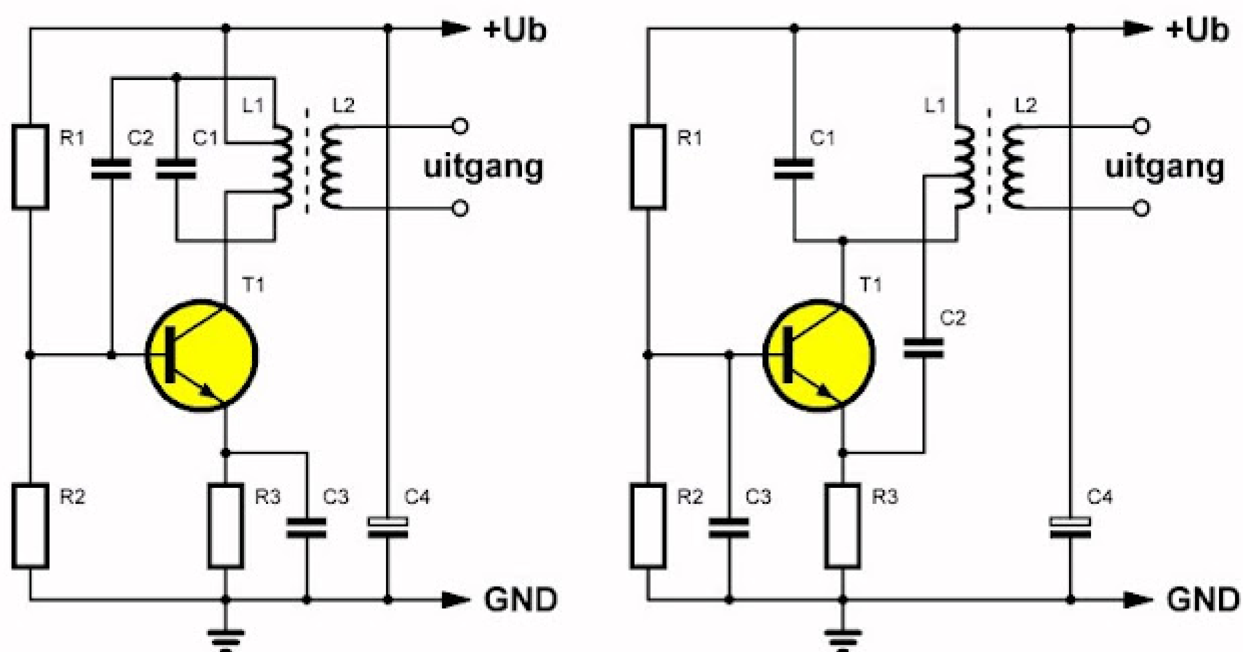
De Colpitts oscillator
Deze oscillatorschakeling werkt volgens het principe van de capacitieve driepunt schakeling. Zoals uit de onderstaande schema's blijkt is de resonantiekring samengesteld uit twee in serie geschakelde condensatoren C1 en C2 en één spoel L1. De terugkoppeling vindt plaats van de collector naar de basis bij de emitter-schakeling en van de collector naar de emitter bij de basis-schakeling. Het derde element (respectievelijk de emitter en de basis) wordt door een condensator ontkoppeld naar de massa. Bij de emitter-schakeling is dat C4, bij de basisschakeling C3. Vanwege de twee condensatoren in de frequentie-bepalende kring is deze schakeling meer geschikt voor het genereren van een vaste frequentie.



Principe van de Colpitts oscillator, links met emitter-, rechts met basis-schakeling.
(© 2024 Jos Verstraten)

De Hartley oscillator
Deze schakeling werkt volgens het inductieve driepunt principe. De spoel is nu volgens het spaartrafo principe opgebouwd. De basis en de collector van de transistor zijn verbonden met aftakkingen op de spoel. Dit geldt voor de gemeenschappelijke emitter-schakeling. De volledige kring staat tussen de basis en de collector. De teruggekoppelde spanning wordt via de condensator C2 aan de basis aangeboden. Deze condensator en de voeding vormen voor de signaalspanning immers een kortsluiting.

In de gemeenschappelijke basis-schakeling (rechts) wordt de uitgang via de condensator C2 teruggekoppeld naar de emitter. U kunt de emitterweerstand R3 niet te klein maken, omdat deze weerstand de resonantiekring rechtstreeks belast.



Principe van de Hartley oscillator, links met emitter-, rechts met basis-schakeling.
(© 2024 Jos Verstraten)